DOI: 10.5846/stxb201512172517
韩增林,胡伟,钟敬秋,胡渊,刘天宝.基于能值分析的中国海洋生态经济可持续发展评价.生态学报,2017,37(8):2563-2574.
Han Z L, Hu W, Zhong J Q, Hu Y, Liu T B.Sustainable development of marine eco-economics based on an emergy analysis in China. Acta Ecologica Sinica,2017,37(8):2563-2574.

基于能值分析的中国海洋生态经济可持续发展评价

韩增林[1],胡 伟[1,*],钟敬秋[1],胡 渊[1],刘天宝[2]
1 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展中心, 大连 116029
2 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029

摘要:海洋生态经济可持续发展的研究既是生态经济研究的重要领域,也是海洋经济研究的重点领域。运用能值分析构建中国海洋生态经济系统能值分析模型和指标体系,以中国沿海地区及其附近海域为研究区域,利用 2013 年的数据对中国海洋生态经济系统的可持续发展水平进行能值测度。研究表明:(1)2013 年,中国沿海各省的海洋生态经济总能值为 1.70×10^{24} sej,可更新资源能值占主体地位。(2)受沿海各省海洋经济发展水平不同和区域海洋资源储量影响,中国沿海地区海洋生态经济能值密度分布差异较大,能值货币比率以上海为界,南高北低,高中低 3 种能值产出率结构并存且以中能值产出率结构为主。(3)中国海洋生态经济系统的生态承载力以高承载力和较高承载力为主,但局部地区海洋生态承载力偏低影响区域海洋生态系统平衡。中国海洋生态经济系统环境负载率较大,环境负载率高的地区与我国海洋经济发达地区高度耦合。(4)从可持续发展指数来看,中国海洋生态经济发展的整体可持续性较好,局部地区环境负载率过大和生态承载力偏低严重制约着区域海洋生态经济的可持续发展。

关键词:海洋生态经济;能值分析;沿海地区;可持续发展

Sustainable development of marine eco-economics based on an emergy analysis in China

HAN Zenglin[1], HU Wei[1,*], ZHONG Jingqiu[1], HU Yuan[1], LIU Tianbao[2]
1 *Research Center for Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian* 116029, *China*
2 *College of Urban and Environment, Liaoning Normal University, Dalian* 116029, *China*

Abstract: The sustainable development of marine eco-economic systems is fundamental for ecological and marine economic systems. The present study used emergy analysis to develop a model and index system for marine eco-economic systems. We selected coastal and sea areas in China and used data from 2013 to examine sustainable development of the marine eco-economic system. The results show that the: (1) in 2013, total emergy of marine eco-economic systems of coastal provinces is 1.70×10^{24} sej, and renewable resource emergy comprised the principal portion of emergy in China; (2) emergy density of different coastal provinces showed considerable differences, which were affected by regional marine resource reserves and economic development levels. The emergy currency ratio was high in the south of Shanghai and low in the north. The emergy yield ratio of marine eco-economic systems had high, middle, and low structures, and was predominantly composed of the middle structures; (3) marine eco-economic systems of China are based on a relatively high marine ecological capacity. However, the marine ecological capacity in some areas is lower than other regions, which influenced the balance of regional marine ecosystems. The environmental load ratio of marine eco-economic systems was high, indicating a more developed marine economy; (4) from the index of sustainable development, the integral sustainability of the Chinese marine economy

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41571122);部省共建人文社会科学重点研究基地项目(14JJD790038)
收稿日期:2015-12-17; **网络出版日期**:2016-10-29

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: huweilt1990@163.com

is good, but there is a heavy environmental load ratio, and the lower marine ecological capacity of some areas could affect the sustainable development of the regional marine economy.

Key Words: marine eco-economics; emergy analysis; coastal areas; sustainable development

我国海洋资源丰富,大陆架海域中石油资源蕴藏量超过 150 亿 t,海洋天然气总量达到 14.09 万亿 m^3,海洋生物种类超过 2 万种。丰富的海洋资源为我国海洋经济发展提供了良好的资源条件,2013 年中国海洋生产总值达到 54313.2 亿元,占国内生产总值的 9.5%,海洋经济在我国经济中的地位日益凸显。但是在海洋经济的发展过程中,海洋生态环境却承受着巨大压力,我国沿海地区海洋生态环境急剧恶化,严重制约着中国海洋经济的可持续发展。因此,未来中国海洋经济的发展应当构建海洋生态文明,发展海洋生态经济。2012 年,党的"十八大"提出,大力推进生态文明建设。2015 年,"十三五"规划中将加强生态文明建设作为"十三五"时期的重要目标。海洋生态经济作为生态文明中不可或缺的组成部分,不仅是我国经济可持续发展重要支撑,更是实现人海和谐的重要保障[1]。

国外学者从 20 世纪 90 年代开始海洋生态经济的研究,其中以 Costanza 和 Martinez 的工作最具代表性,Costanza 在构建海洋生态经济价值类别体系的基础上,详细剖析并评估了全球海洋的生态、经济和社会价值[2];Martinez 研究了沿海区域的生态、经济和社会重要性,提出应继续推进海洋生态经济评估工作,以确保沿海实现最有价值的可持续发展[3]。此外,Kildow 的研究认为当前海洋生态与海洋产业正面临许多问题,需要对海洋和沿海不同地区采取经济、生态恢复措施[4]。国内学者对海洋生态经济的研究集中在海洋生态系统价值、海洋生态承载力、海洋生态经济可持续发展等方面。海洋生态系统价值研究开始于国家海洋局主导的胶州湾生态系统服务功能项目的研究[5],其研究构建了海洋生态系统服务价值的估算框架体系和评估了海洋生态系统的服务价值[6-8]。海洋生态承载力的研究侧重海洋生态承载力的综合评价和评价体系的完善[9],随着海洋生态承载力的研究不断深入,海洋生态承载力的影响因素受到更多的关注[10-13]。海洋生态经济可持续发展研究是相关研究的重点[14-17]:谭映宇、苗丽娟从海洋生态环境承载力出发对海洋生态经济可持续发展水平进行评价[10-11];李博、孙才志分别从脆弱性和海域生态承载力的视角对环渤海地区的海洋生态经济发展水平进行测度[18-19];狄乾斌从熵视角出发评估了中国海洋生态系统可持续发展能力[20];陈东景利用人文发展指数和生态足迹指数构建了可持续性评价指标体系[21];韩增林在海陆复合生态系统理论框架下分析了海洋功能并强调了人类系统与海洋生态系统的和谐[22-23];苏伟将水环境系统和经济系统结合研究了泛北部湾经济区近岸海域环境与经济发展的协调度[24]。随着海洋生态环境的恶化,海洋生态的修复和海洋生态经济可持续发展研究将是今后研究的重点。国内外对于海洋生态经济的研究注重海洋生态与海洋经济的协调发展,强调海洋生态环境的保护,但其研究视野都局限在单个生态系统的分析,缺乏从海洋生态、海洋经济和海洋社会多个系统对海洋生态经济的综合分析。已有的采用能值理论研究生态经济多是基于陆地生态经济的研究,缺乏利用能值分析对全国海洋生态经济的研究[25-26]。海洋生态经济与陆地生态经济相比有其特殊性,不能一概而论,本文率先尝试通过能值将海洋生态系统、海洋经济系统、海洋社会系统联系起来,将所有指标转换为统一的能值进行可持续发展评价,更具科学性和客观性。本文在借鉴相关研究成果基础上,以中国沿海地区及其附近海域为研究区域,定量分析和定性分析相结合来研究我国海洋生态经济的可持续性,旨在更深刻的认识海洋生态经济,为海洋自然资源的有效利用和海洋生态经济可持续发展提供依据。

1 研究区域

研究区域为我国东部沿海 11 省市及其附近海域(图 1),各省海域面积以《全国海洋功能区划(2001—2002)》中区划面积为基准,不包括海南省三沙市 200km^2 的海域。研究区域陆地面积约 130 万 km^2,海域面积约 130 万 km^2。研究区蕴藏着丰富的石油、天然气、海砂矿产等资源和太阳能、雨水化学能、风能、潮汐能等可

再生能源[27]。研究区域长期资源和能源的开发创造了巨大的经济效益,但是海洋开发过程中人类活动对海洋生态的负面影响超出了海洋生态系统所能承受的极限,严重打破了海洋生态系统的平衡。2013 年,全国劣于第四类水质海域面积约多达 4.43 万 km^2。近年来,人类排放入海的污染物不断增加,海水水质恶化,海水富营养化加剧,海洋赤潮、绿潮和海洋沉淀物等增多,海洋开采和工业生产造成的溢油事故频发,造成海洋生态环境急剧恶化。越来越多的沿海生态区域处于不健康的状态,海洋生物种类减少,生态服务功能减弱。2013 年,中国沿海区域处于亚健康和不健康状态的海洋生态系统占 77%,陆源入海排污口达标率仅为 50%。中国沿海地区海洋经济的快速发展更多的是以牺牲资源和生态为代价,发展海洋生态经济是我国实现海洋强国战略目标的必然选择。

图 1 研究区域

Fig.1 Study area

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 能值分析理论

能值分析理论和方法是由美国学者 H.T.Odum 创立,某一流动或储存的能量所包含另一种类别能量的数量就是能值[28]。地球上主要的能量都源于太阳,因此在能值分析中以太阳能值为标准衡量任何类别的能量。某种流动或储存的能量所包含太阳能量即为该能量的太阳能值。某种物质的能量转换为太阳能值是通过能值转换率实现的。能值转换率是每单位某种类别的能量或物质所含能值之量,某种能量的能值转换率越高,该能量的能值越高。能值(sej)= 能值转换率(sej/j)×能量(j)。不同物质有不同能值转换率,通过把不同种类、不可比较的能量转换成可以进行比较的同一标准——能值,某一系统中流动或储存不同类别能量及其在系统中的贡献就可以进行比较[29]。能值分析不仅解决了不同类型的能量无法进行核算的问题,而且为能量流、物质流、价值流之间的转换提供了途径。能值分析理论为生态经济系统的研究提供了定量分析研究的新方法,提供了衡量和比较研究的新方法[30]。

2.1.2 能值密度

能值密度是一个国家或地区能值总利用量与该国家或地区面积之比(sej/m^2)。能值密度公式为:$D=\frac{U}{S}$,式中 U 为能值总量,S 为区域面积[28]。

2.1.3 能值货币比率

能值货币比率是指国家或地区单位货币所相当的能值量[28]。由国家的能值/货币比率推出海域能值/货币比率的计算公式:海域能值/货币比率(sej/ ¥)= $\frac{\text{能值总量}}{\text{海洋生产总值}}$。

2.1.4 能值产出率

能值产出率(EYR)为系统产出能值与经济反馈能值之比。能值产出率的计算公式为:$\mathrm{EYR}=\frac{O}{I}$,式中 I 为输入能值,O 为输出能值[28]。

2.1.5 环境负载率

环境负载率(ELR)为不可更新资源投入能值总量与可更新资源投入能值总量比。环境负载率的计算公

式为：$ELR=\frac{U-Er}{Er}$，式中 U 为能值总量。Er 为可更新资源投入能值总量[28]。

2.1.6 海洋能值-生态承载力

海洋能值-生态承载力（MEEC）的计算公式为：$MEEC=\frac{Er}{D}$，式中 Er 表示可利用的海洋生态经济系统可更新资源的能值，D 表示海洋生态经济系统的能值密度[31]。

2.1.7 能值可持续发展指数

可持续发展指数（ESI）为能值产出率与环境负载率的比值。计算公式为：$ESI=\frac{EYR}{ELR}$，EYR 为能值产出率，ELR 为环境负载率[32-33]。

2.2 数据来源

本文以 2013 年的数据为基准进行评估。太阳辐射能、风能、雨水化学能、地球旋转能原始数据来源于 2014 年沿海 11 省市发布的统计年鉴和 2014 年《中国统计年鉴》；潮汐能原始数据来源于国家海洋环境预报中心监测数据；海洋捕捞、海水养殖、海洋原油、海洋天然气、海盐、海洋矿物、海洋电力、红树林、入海废水原始数据来源于 2014 年发布的《中国海洋统计年鉴》和《中国环境统计年鉴》。能值项目指标计算方法参考 Odum[28]、狄乾斌[31]和 Brown[32-33]的研究成果。本文能值分析采用 9.44×10^{24} sej/a 的全球能值基准[34]，各种物质、能量、货币的能值转换率来自蓝盛芳[34]、宋涛[35]的研究成果（表 1）。

表 1 能值转换率

Table 1 Emergy transformity

能值项目 Item	能值转换率 Transformity/(sej/unit)	参考文献 References	能值项目 Item	能值转换率 Transformity/(sej/unit)	参考文献 References
太阳辐射能 Sunlight/J	1	[34]	海洋原油 Offshore oil /J	$5.40E\times10^{4}$	[34]
雨水化学能 Rain(chemical)/J	1.80×10^{4}	[34]	海洋天然气 Marine gas/J	4.80×10^{4}	[34]
地球旋转能 Earth rotational/J	3.40×10^{4}	[34]	海盐 Sea salt /g	1.00×10^{9}	[34]
风能 wind/J	1.50×10^{3}	[34]	海洋矿物 Marine Mineral/g	1.00×10^{9}	[34]
潮汐能 Tidal /J	1.70×10^{4}	[34]	红树林 Mangrove/J	4.40×10^{4}	[34]
海洋捕捞 Marine fishing/J	2.00×10^{6}	[34]	废水 Waste water/J	8.60×10^{5}	[34]
海水养殖 Mariculture/J	2.00×10^{6}	[34]	海洋生产总值 Gross ocean product/ $	6.34×10^{12}	[35]
海洋电力 Offshore power/J	8.00×10^{4}	[34]			

3 中国海洋生态经济系统的能值测度

3.1 海洋生态经济系统能值分析模型

海洋生态经济系统是由海洋生态系统、海洋经济系统与海洋社会系统相互作用、相互交织、相互渗透而构成的具有一定结构和功能的特殊复合系统[1]。海洋生态子系统由海洋自然资源与环境构成，包括海洋生物、海洋矿产资源、海洋能源、海水资源、海域空间资源等自然要素；海洋经济子系统以各类海洋资源的开发、利用和保护为核心，包括海洋渔业、海洋矿业、海洋化工业、海洋工程建筑业、海洋交通运输业、海洋旅游业等产业部门要素；海洋社会子系统以人为核心，以满足人类对各类海洋产品的需求为目的，由思想观念、道德精神、文化艺术、教育、科技、法规和制度等要素组成。海洋生态系统为海洋社会生系统与海洋经济子系统的活动提供支撑、容纳、缓冲、净化等服务。海洋经济系统促使各类海洋资源物质从分散向集聚运转、能量由低效到高效聚集、信息自低序向高序反馈、价值由低质到高质积累。海洋社会系统为海洋经济系统提供劳动力与智力支持。海洋生态经济系统结构及运行方式如图 2 所示。

长期以来对海洋资源系统、海洋生态系统、海洋经济系统的研究强调单一经济效益产出或者生态效益产

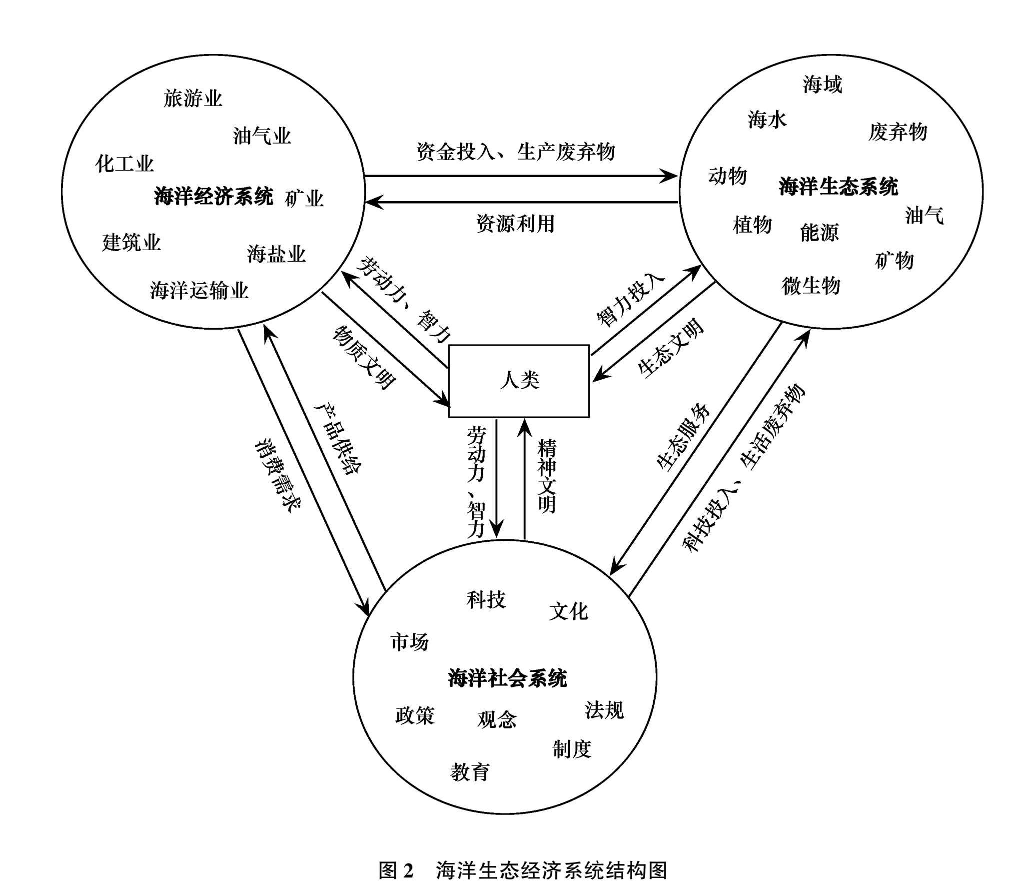


图 2　海洋生态经济系统结构图

Fig.2　Structure of marine eco-economic system

出,缺乏生态和经济效益的综合研究。本文结合海洋生态经济系统结构的内涵和能值分析理论构建了海洋生态经济系统能值结构图(图 3)。

海洋生态经济系统能值分析模型,一是考虑到海洋生态经济系统的复合性,注重海洋生态子系统、海洋经济子系统、海洋社会子系统之间相互关联、相互影响,本文基于可持续发展考虑侧重从海洋生态、海洋经济两个角度对海洋生态经济进行综合评价;二是突出单个子系统的地位,基于系统功能和要素明确各个子系统在整个海洋生态经济系统中的位置和内涵;三是强调了海洋产业与海洋资源之间联系,强化了海洋资源对海洋经济发展的重要支撑作用;四是量化了废弃物对海洋生态经济系统可持续性的影响,克服了生态经济分析中对废弃物由于缺乏量化而采用定性分析的缺陷。

海洋生态经济系统能值结构由海洋生态系统、海洋经济系统和海洋社会系统组成,海洋生态系统包括太阳、风、雨水、潮汐、红树林等要素,海洋经济系统包括渔业、旅游业、采矿业、油气业等要素,海洋社会系统包括劳务、科技等要素。废弃物和生态服务是物质流、能量流转换的重要环节,市场是系统中物质流和价值流转换的桥梁。线条表示系统中要素之间能量流、物质流、信息流的流通转换,其中实线表示能量流、物质流、信息流,虚线表示货币流,箭头表示方向。海洋生态系统中海水、红树林、海洋矿物等资源在人类开发作用下,通过能量流、物质流的转换支撑着海洋产业的发展,形成渔业、旅游业、采矿业等主要海洋产业部门,海洋产业部门创造的经济价值经过价值流转换流向市场。

3.2　中国海洋生态经济能值测度

本文结合指标数据的可获取性,根据能值分析理论和海洋生态经济系统能值分析模型构建了海洋生态经济能值分析指标体系(表 2),指标体系由可更新资源指标和不可更新资源指标构成,可更新资源包括太阳辐射能、风能、雨水化学能、潮汐能、地球旋转能、海洋捕捞 、海水养殖、海洋电力、海盐、红树林、入海废水;不可更新资源包括:海洋原油、海洋天然气、海洋矿物。本文的能值指标体系弥补了传统的海洋生态系统能值分析

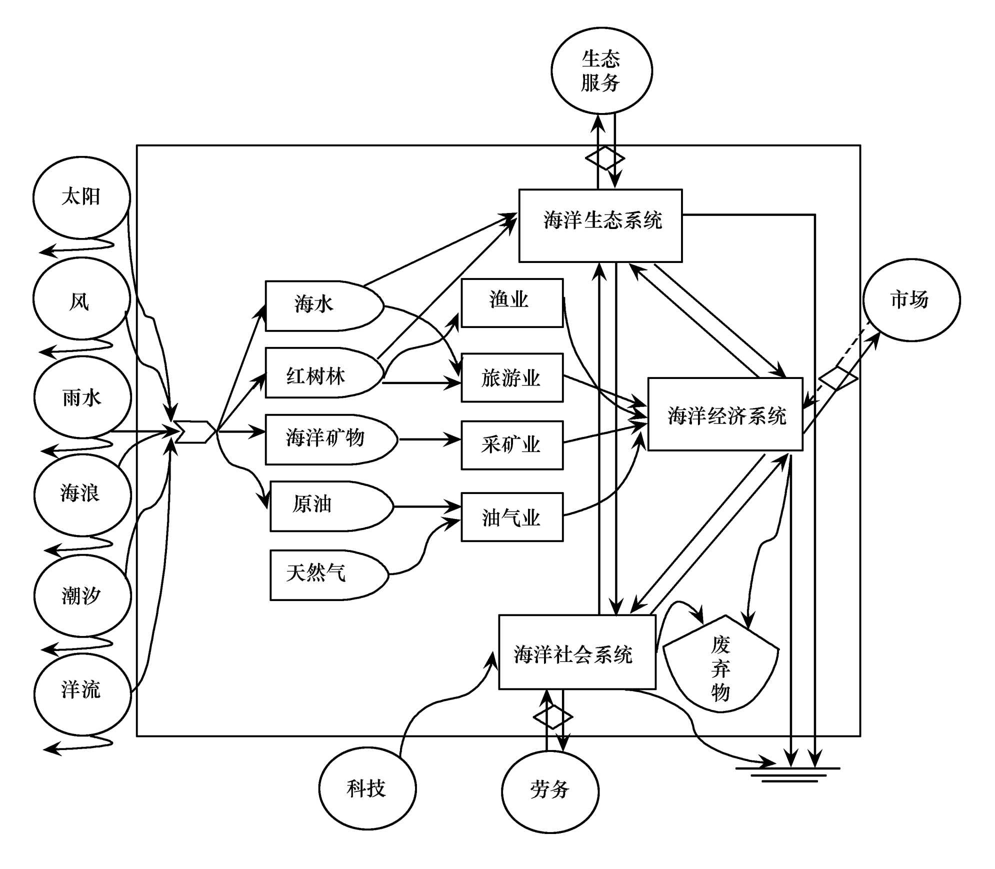


图 3 海洋生态经济系统能值结构图

Fig.3 The system emergy diagram of marine eco-economic

研究中缺乏经济指标的不足,同时综合考虑到海洋生态经济系统中废弃物的产出,更利于系统全面地评价海洋生态经济系统的运行状态及可持续发展水平。鉴于海洋生态经济系统中废气和固体废弃物无法获取统计数据,海洋生态经济系统中的废弃物主要指海洋生态经济系统排放入海的废水。

表 2 2013 年中国海洋生态经济系统能值表

Table 2 Emergy indices of Chinese marine eco-economic system in 2013

项目 Item	辽宁	天津	河北	山东	江苏	上海	浙江	福建	广东	海南	广西
太阳辐射能/sej Sunlight	1.39×10^{21}	2.38×10^{19}	4.36×10^{19}	1.32×10^{21}	2.90×10^{20}	5.90×10^{19}	1.74×10^{21}	8.61×10^{20}	2.53×10^{21}	1.30×10^{22}	7.00×10^{20}
雨水化学能/sej Rain(chemical)	9.88×10^{21}	1.10×10^{20}	3.59×10^{20}	1.01×10^{22}	2.95×10^{21}	9.39×10^{20}	3.49×10^{22}	1.89×10^{22}	7.92×10^{22}	3.84×10^{23}	3.00×10^{22}
地球旋转能/sej Earth rotational	5.11×10^{21}	1.02×10^{20}	2.46×10^{20}	5.42×10^{21}	1.28×10^{21}	3.06×10^{20}	8.84×10^{21}	4.63×10^{21}	1.43×10^{22}	6.80×10^{22}	4.40×10^{21}
风能 Wind/sej	1.75×10^{21}	3.49×10^{19}	8.41×10^{19}	1.86×10^{21}	4.36×10^{20}	1.05×10^{20}	3.03×10^{21}	1.59×10^{21}	4.88×10^{21}	2.33×10^{22}	1.50×10^{21}
潮汐能 Tidal/sej	4.61×10^{22}	1.15×10^{21}	2.87×10^{21}	8.17×10^{22}	2.96×10^{22}	5.49×10^{21}	4.48×10^{22}	1.52×10^{23}	2.58×10^{22}	5.35×10^{22}	2.84×10^{22}
海洋捕捞/sej Marine fishing	9.94×10^{21}	4.92×10^{20}	2.12×10^{21}	2.13×10^{22}	5.10×10^{21}	1.81×10^{20}	2.94×10^{22}	1.78×10^{22}	1.37×10^{22}	1.03×10^{22}	5.99×10^{21}
海水养殖/sej Mariculture	2.60×10^{22}	1.13×10^{20}	4.17×10^{21}	4.21×10^{22}	8.65×10^{21}	0.00	8.03×10^{21}	3.27×10^{22}	2.64×10^{22}	2.28×10^{21}	9.73×10^{21}
海洋原油/sej Offshore oil	2.74×10^{20}	6.40×10^{22}	5.83×10^{21}	7.08×10^{21}	0.00	4.53×10^{20}	0.00	0.00	3.27×10^{22}	0.00	0.00
海洋天然气/sej Marine gas	2.57×10^{19}	4.77×10^{21}	1.23×10^{21}	2.35×10^{20}	0.00	1.45×10^{21}	0.00	0.00	1.37×10^{22}	0.00	0.00
海盐 Sea salt/sej	9.83×10^{20}	1.52×10^{21}	2.88×10^{21}	1.99×10^{22}	7.76×10^{20}	0.00	1.59×10^{20}	2.92×10^{20}	7.75×10^{19}	6.56×10^{19}	1.61×10^{20}

续表

项目 Item	辽宁	天津	河北	山东	江苏	上海	浙江	福建	广东	海南	广西
海洋矿物/sej Marine mineral	0.00	0.00	0.00	1.32×10^{22}	0.00	0.00	2.13×10^{22}	3.00×10^{21}	0.00	2.01×10^{21}	4.81×10^{21}
海洋电力/sej Offshore power	4.92×10^{17}	8.78×10^{16}	6.35×10^{16}	1.81×10^{18}	7.73×10^{17}	1.07×10^{17}	1.71×10^{17}	4.45×10^{17}	5.38×10^{17}	8.78×10^{16}	7.20×10^{14}
红树林/sej Mangrove	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.87×10^{19}	4.60×10^{19}	1.11×10^{20}	4.65×10^{19}	6.19×10^{19}
入海废水/sej Waste water	9.07×10^{20}	1.87×10^{18}	4.98×10^{19}	3.82×10^{20}	3.11×10^{19}	4.23×10^{20}	3.30×10^{20}	1.83×10^{21}	3.75×10^{20}	1.40×10^{20}	1.29×10^{20}
总计 Total/sej	1.02×10^{23}	7.23×10^{22}	1.99×10^{22}	2.05×10^{23}	4.91×10^{22}	9.41×10^{21}	1.53×10^{23}	2.34×10^{23}	2.14×10^{23}	5.56×10^{23}	8.59×10^{22}

中国海洋生态经济系统能值表包含太阳辐射能、风能、雨水化学能、潮汐能、地球旋转能、海洋捕捞 、海水养殖、海洋电力海洋原油、海洋天然气、海盐、海洋矿物、红树林、入海废水 14 个能值指标项目（表 1）。通过能值计算,2013 年中国沿海各省的海洋生态经济总能值为 1.70×10^{24}sej,其中可更新资源能值 1.52×10^{24}sej,不可更新资源能值 1.76×10^{23}sej。中国海洋生态经济能值系统中可更新资源能值比重达到 89.6%,说明可更新资源在中国海洋生态经济中起主导作用,未来我国海洋生态经济的发展应当注重可更新资源的开发和利用。

从能值指标项目上看,中国海洋生态经济系统中的 14 个指标项目的整体能值总量从大到小依次是雨水化学能、潮汐能、海水养殖、海洋捕捞、地球旋转能、海洋原油、海洋矿物、风能、海盐、太阳辐射能、海洋天然气、入海废水、红树林、海洋电力。雨水化学能是降水贡献的能量,在 14 个能值指标项目中雨水化学能能值最大,说明降水是海洋生态经济能值系统中的关键因素。从海洋生态经济系统的能值空间分布看,沿海 11 个省市海洋生态经济能值总量从大到小依次是海南、福建、广东、山东、浙江、辽宁、广西、天津、江苏、河北、上海。海南省海域面积广大,资源丰富,能值总量最大,海洋经济发展潜力巨大。

4　中国海洋生态经济系统能值分析

根据能值理论,结合海洋生态经济系统的效益性、生态性、可持续性的特征,本文以 2013 年中国海洋生态经济系统能值数据为基础,分别从能值密度、能值货币比率、能值产出率、海洋能值-生态承载力、环境负载率以及能值可持续发展指数切入,以省域为单位进行对比研究,剖析中国海洋生态经济系统的运行状态和可持续发展水平。

4.1　中国海洋生态经济系统可持续发展评价

4.1.1　能值密度

能值密度反映经济发展强度和经济发展等级。能值密度越大,说明经济越发达,在等级中的地位越高[28]。基于 2013 年中国海洋生态经济系统的能值密度数据,沿海 11 个省市的能值密度从大到小依次是天津、河北、福建、江苏、山东、上海、辽宁、广西、浙江、广东、海南。按照聚类分析和数量级分类[36]:$D>2\times10^{13}$ sej/m^{2}为高密度地区, 1×10^{12} sej/m$^2 < D \leq 2\times10^{13}$ sej/m^{2}为较高密度地区,3×10^{11} sej/m$^2 < D \leq 1\times10^{12}$ sej/m^{2}为较低密度地区,$D\leq3\times10^{11}$ sej/m^{2}为低密度地区。根据分类结果(图 4),天津处于高密度地区,河北、福建、江苏、山东、上海处于较高密度地区,辽宁、广西、浙江、广东中处于较低密度地区,海南处于低密度地区。在沿海 11 个省市中,虽然天津的海域面积最小,但其海洋天然气、海洋原油、海盐资源丰富,海洋资源开发力度大,因此能值密度最高。河北、福建、江苏、山东、上海的海洋资源开发早,经济发达,资源利用率较高,能值密度较高。辽宁、浙江、广东海洋经济发达,但海洋资源分布不均衡,海洋矿产资源匮乏,广西缺乏海洋油气资源,因此处于较低密度地区。海南能值总量最大,但海域面积最大,海洋经济又处于开发阶段,因此能值密度最低。总体来说,沿海各省的能值密度等级与沿海各省的海洋经济发展水平基本一致,能值密度越高的区域,海洋经济越发达。

4.1.2　能值货币比率

能值货币比率是指国家或地区单位货币所相当的能值量。能值货币比率反映经济系统中循环流通的货

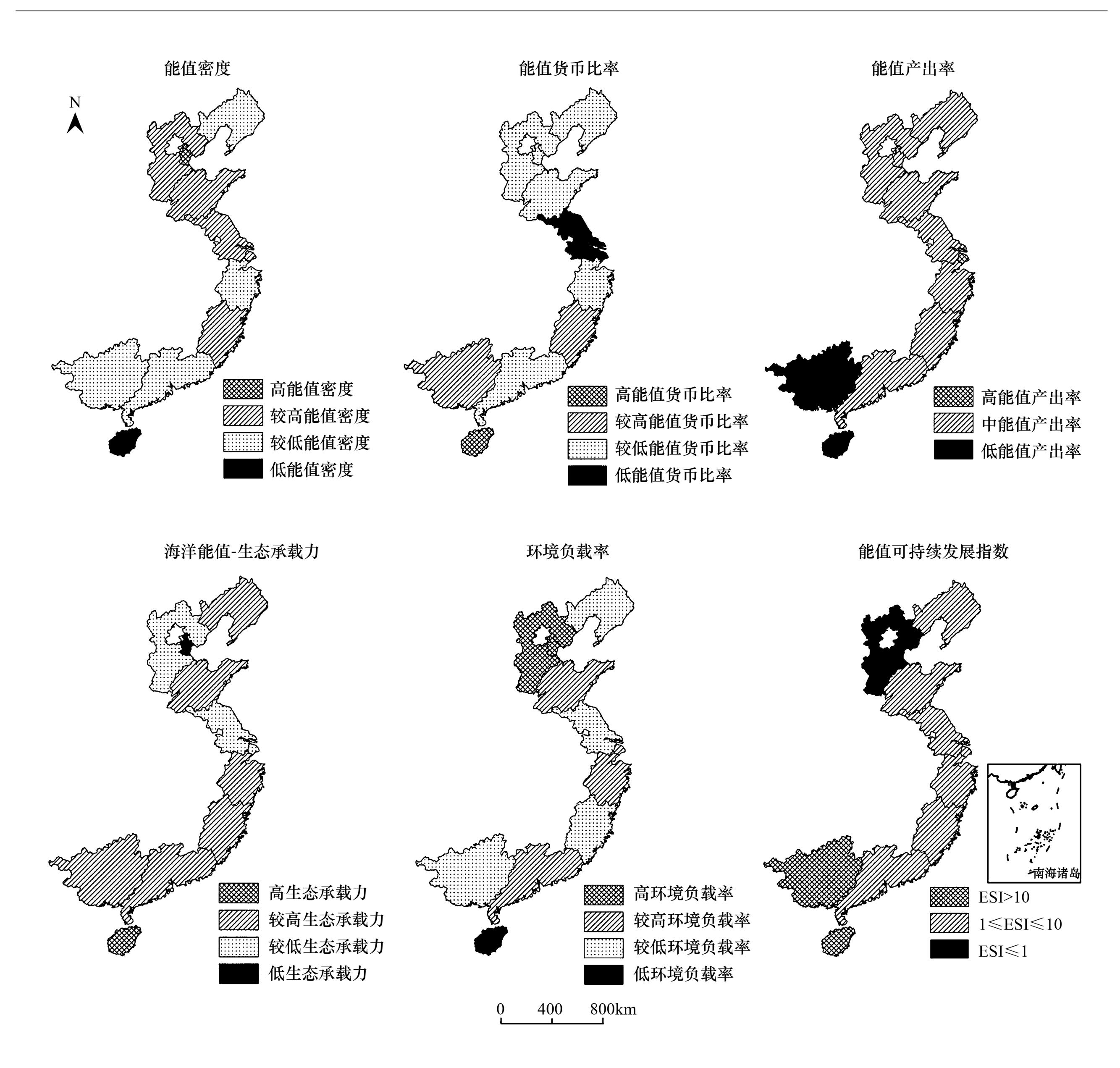


图 4 中国海洋生态经济系统能值分析图

Fig.4 Emergy analysis of marine eco-economic system

币的能值效益,即单位货币的能值量。能值货币比率越高,代表单位货币所购买的能值财富越多,经济开发程度越低。欠发达地区具有较高的能值货币比率,这些地区的经济活动所耗费的能值大多直接来自于无需付费的自然环境资源。2013 年,沿海 11 个省市中能值货币比率从大到小依次是海南、广西、福建、浙江、辽宁、山东、广东、天津、河北、江苏、上海。按照聚类分析和数量级分类(图 4),海南是高能值货币比率地区,广西、福建是较高能值货币比率地区,浙江、辽宁、山东、广东、天津、河北是较低能值货币比率地区,江苏、上海是低能值货币比率地区。沿海 11 个省市的能值货币比率大小排序反映我国沿海各个区域海洋经济开发程度差异,能值货币比率最大的是海南,最小的是上海,说明上海的海洋经济发达,开发程度最高,海南的海洋经济发展水平最低,海洋经济开发程度较低。江苏、河北、天津、广东、山东是我国海洋经济开发较早的区域,区域内海洋经济发达,因此能值货币比率较高;辽宁、浙江、福建、广西、海南的海洋开发起步较晚,区域海洋资源开发程度相对较低,因此能值货币比率较低。从整个中国沿海地区而言,能值货币比率差异显著,以上海为界,南高北低,辽宁、天津、河北、山东、江苏为低能值货币比率或较低能值货币比率地区,高能值货币比率或较高能值

货币比率则集中在海南、广西、福建,这反映我国海洋经济发展不均衡,区域海洋经济发展水平差异较大。

4.1.3　能值产出率

海洋生态经济系统的输入能值包含太阳辐射能、风能、雨水化学能、潮汐能、地球旋转能的能值。海洋生态经济系统的产出能值包括海洋捕捞 、海水养殖、海洋电力、海洋原油、海洋天然气、海盐、海洋矿物、红树林和入海废水。能值产出率是衡量一个生态经济系统产出对外界经济贡献大小的指标,能值产出率值越高,系统的生产效率越高,系统的经济竞争力越强。2013 年,沿海 11 省市能值产出率从大到小依次是上海、江苏、河北、天津、广东、山东、辽宁、浙江、福建、广西、海南,最大的上海为 49.81,最小的海南为 0.03。按照聚类分析和数量级分类(图 4),上海是高能值产出率地区,江苏、河北、天津、广东、山东、辽宁、浙江、福建是中能值产出率地区,广西、海南是低能值产出率地区。上海的海洋生态经济系统效率远高于其他地区,主要因为上海海洋经济发达,海洋生产总值大,但区域面积小,消耗能值少。海南省 2013 年的海洋生产总值在沿海 11 个省市中最小,仅为上海的七分之一,但海南拥有广阔的海域面积,丰富的海洋资源,海洋生态经济系统中输入能值多,因此,海南的能值产出率最小,同时说明海南的海洋资源没有得到充分利用,经济效益差。江苏、河北、天津、广东、山东的海洋经济总量大,经济效益好,能值产出率大;辽宁、浙江、福建、广西的海洋经济正处于快速发展中,海洋生产总值较小,能值产出率较小。中国海洋生态经济的能值产出率呈现出高中低三种能值产出率并存的结构,且以中能值产出率结构为主。

4.1.4　海洋能值-生态承载力

海洋能值-生态承载力是海洋生态系统中可更新资源的能值与能值密度的比值。海洋能值-生态承载力一方面代表生态系统的自我维持与自我调节能力及资源与环境子系统的供容能力,另一方面反映海洋生态系统内社会经济子系统的发展能力。2013 年,沿海 11 省市中海洋能值-生态承载力从大到小依次是海南、广东、浙江、辽宁、福建、山东、广西、江苏、上海、河北、天津,海南省的海洋能值-生态承载力最高达到 $1.99\times10^{12}/m^2$,天津市的海洋能值-生态承载力最小为 $8.41\times10^{7}/m^2$。按照聚类分析和数量级分类(图 4),海南是高生态承载力地区,广东、浙江、辽宁、福建、山东、广西是较高生态承载力地区,江苏、上海、河北是较低生态承载力地区,天津是低生态承载力地区。区域海洋生态系统中,可再生资源越多,海洋能值-生态承载力越大;区域海洋经济越落后,能值密度越小,海洋能值-生态承载力越大。在沿海 11 个省市中,海南省的可再生资源多,且能值密度最小,因此海洋能值-生态承载力最大。天津的海洋资源以不可再生的海洋矿物资源为主,且海洋经济发达,能值密度大,因此海洋能值-生态承载力最小。总体而言,中国海洋生态系统的生态承载力以高承载力和较高承载力为主,但局部地区生态承载力偏低。生态承载力高或者较高地区,区域海洋生态环境好,海洋经济发展前景广阔,应当在保护好海洋生态的同时充分利用海洋资源,推动我国海洋经济的进一步发展。生态承载力较低或低地区,区域海洋生态脆弱,海洋经济发展潜力有限,应当更加注重保护海洋生态环境。

4.1.5　环境负载率

环境负载率反映一定的经济活动水平下系统所承受的压力,环境负载率越大,系统所承受的压力越大。2013 年,沿海 11 省市的环境负载率从大到小依次是天津、河北、上海、广东、山东、浙江、广西、福建、辽宁、江苏、海南。区域间环境负载率差异巨大,环境负载率最大的天津高达 34.66,海洋生态经济系统的环境压力极大;环境负载率最小的海南为 0.004,海洋生态经济系统的环境压力极小。按照聚类分析和数量级分类(图 4),天津、河北为高环境负载率地区,上海、广东、山东、浙江为较高环境负载率地区,广西、福建、辽宁、江苏为较低环境负载率地区,海南为低环境负载率地区。区域可再生资源和不可再生资源结构和能值结构影响区域环境负载率。天津海洋经济生态系统中不可再生资源能值是可再生资源能值的 35 倍,海洋生态经济系统的运行过分依赖不可再生资源,因此环境负载率最大。较高环境负载率地区不可再生资源能值大于可再生资源能值,较低环境负载率地区的不可再生资源能值小于可再生资源能值。低环境负载率地区的可再生资源能值大大超过不可再生资源能值。中国海洋生态经济系统的整体环境负载率较大,且环境负载率高的地区与我国海洋经济发达地区高度耦合,说明我国海洋经济在发展的同时给沿海地区带来较大的环境压力。值得注意的

是,沿海地区整体环境负载率从 2009 年的 0.97 下降到 2013 年为 0.12,海洋生态经济系统的环境负载率下降说明近年来我国海洋生态环境保护工作取得一定的成效[37]。

4.1.6 能值可持续发展指数

能值可持续发展指数反映系统的可持续发展程度。ESI<1 时,属于消费型经济,此时系统进口资源或劳务量在总能值使用量中所占比重较大,环境负载率较大;ESI 的值在 1—10 时,表明经济富有活力和发展潜力;ESI>10 时,则是经济不发达的表现,表明对资源的开发利用不够。2013 年,沿海 11 省市的可持续发展指数(图 4)从大到小依次是广西、海南、江苏、上海、辽宁、福建、浙江、山东、广东、河北、天津。其中 ESI<1 的地区有河北、天津,说明河北、天津的海洋经济是消费型经济,环境负载率大,海洋经济发展过程中消耗过多的资源,海洋经济的发展缺乏可持续性。ESI 的值在 1—10 的地区有江苏、上海、辽宁、福建、浙江、山东、广东,这些地区是我国海洋经济最发达的地区,海洋产业结构较合理,第三产业对海洋生产总值增长的贡献突出,经济富有活力,发展效益好,可持续强。ESI>10 的地区有广西、海南,广西、海南的海洋资源丰富,海洋经济发展潜力巨大,但海洋资源优势并没有转化为经济优势,广西、海洋的海洋生产总值远小于广东、山东等海洋强省。从能值可持续发展指数来看,中国海洋经济发展的可持续性较好,但局部地区环境负载率较大影响区域海洋经济的可持续发展。此外,随着中国海洋生态经济的发展,海洋生态经济的可持续发展指数呈下降趋势,沿海地区整体的海洋生态经济可持续发展指数从 1995 年的 107.72 下降到 2009 年 7.86,2013 年进一步下降到 3.45。海洋生态经济可持续发展指数的下降反映我国海洋生态经济从不发达阶段逐步过渡到充满活力的较发达阶段,中国海洋生态经济的可持续性显著增强[37]。

4.2 中国海洋生态经济系统的能值特点

通过对中国海洋生态经济系统的能值分析发现中国海洋生态经济系统的能值结构特征鲜明。首先,中国海洋生态经济系统能值总量巨大,达到 1.70×10^{24} sej,但区域间差异巨大,海南的能值总量是上海的 59 倍,广东省的能值总量是河北省 10 倍。其次,区域海洋资源影响着地区的海洋生态经济系统的能值结构,海洋矿产资源丰富的河北、天津能值总量中不可更新资源比重大,海域面积广阔的海南能值总量中可更新资源比重大。另外,海洋经济的发展给区域环境带来巨大的压力,海洋经济越发达的地区其所承受的环境压力越大,海洋经济强省上海、广东、山东等都面临较大的环境压力。此外,可更新资源能值在中国海洋生态经济系统中居于主导地位,不可更新资源能值有限,但是当前我国海洋经济发展却十分依赖海洋原油、海洋矿产等不可更新资源,未来我国海洋经济发展必须强化可更新资源的利用。

5 结论

基于能值理论,构建反映生态环境质量、经济效益、可持续发展特征的能值指标体系,综合评价我国海洋生态经济系统的运行状态及可持续发展水平,通过对中国海洋生态经济系统进行能值分析,得出以下结论:

(1)2013 年,中国沿海各省的海洋生态经济总能值为 1.70×10^{24} sej,其中可更新资源能值 1.52×10^{24} sej,可更新资源能值比重达到 89.6%。以可更新资源为主体海洋生态经济能值结构为我国海洋生态经济的可持续发展奠定良好的资源基础,同时也表明海洋生态经济的可持续发展应当以可更新资源的开发为主导。

(2)受沿海各省海洋经济发展水平不同和区域海洋资源储量影响,中国沿海地区能值密度分布差异较大,天津能值密度最高,海南能值密度最低。就整个沿海地区而言,能值货币比率南北差异巨大,以上海为界,南高北低。中国海洋生态经济的能值产出率呈现出高中低三种能值产出率并存的结构,且以中能值产出率结构为主。海洋经济发展不平衡和区域海洋经济发展水平差异决定了能值密度、能值货币比率和能值产出率的空间格局差异。

(3)中国海洋生态经济系统的生态承载力以高承载力和较高承载力为主,但局部地区海洋生态承载力偏低影响区域海洋生态系统的平衡。中国海洋生态经济系统的环境负载率较大,且环境负载率高的地区与我国海洋经济发达地区高度耦合,海洋经济的发展给沿海地区带来较大的环境压力。未来海洋生态经济的发展应

当完善海洋生态的管理、修复和保护,构建海洋生态保护机制。

(4)从可持续发展指数来看,中国海洋生态经济发展的整体可持续性较好,局部地区环境负载率过大和生态承载力偏低严重制约着区域海洋生态经济可持续发展。

以能值为基准,通过能值转换率把海洋生态经济系统中不同种类、不可转化的物质流、能量流、货币流转化为统一的能值来衡量,有效地将生态、社会、经济等子系统结合起来[38],解决了以往海洋生态经济发展可持续性分析中存在依赖单个系统、缺乏综合性的问题。基于能值分析构建一系列反映海洋生态环境质量、经济效益、可持续发展特征的能值指标体系能够多角度、较全面的对我国海洋生态经济的可持续发展水平做出客观科学的评价。未来,能值理论与方法运用于生态效率的测度、自然资源的科学评价以及可持续发展研究将是重要的研究趋向。

参考文献(References):

[1] 高乐华, 高强. 海洋生态经济系统界定与构成研究. 生态经济, 2012, (2): 62-66.

[2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[3] Martínez M L, Intralawan A, Vázquez G, Pérez-Maqueo O, Sutton P, Landgrave R. The coasts of our world: ecological, economic and social importance. Ecological Economics, 2007, 63(2/3): 254-272.

[4] Kildow J T, Mcllgorm A. The importance of estimating the contribution of the oceans to national economies. Marine Policy, 2010, 34(3): 367-374.

[5] 陈尚, 张朝晖, 马艳, 石洪华, 马安青, 郑伟, 王其翔, 彭亚林, 刘键. 我国海洋生态系统服务功能及其价值评估研究计划. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1127-1133.

[6] 夏涛, 陈尚, 张涛, 王敏. 江苏近海生态系统服务价值评估. 生态学报, 2014, 34(17): 5069-5076.

[7] 高晓路, 翟国方. 天津市海岸带环境的空间价值及其政策启示. 地理科学进展, 2008, 27(5): 1-11.

[8] 石洪华, 郑伟, 丁德文, 吕吉斌, 张学雷. 典型海洋生态系统服务功能及价值评估——以桑沟湾为例. 海洋环境科学, 2008, 27(2): 101-104.

[9] 狄乾斌, 张洁, 吴佳璐. 基于生态系统健康的辽宁省海洋生态承载力评价. 自然资源学报, 2014, 29(2): 256-264.

[10] 谭映宇, 张平, 刘容子, 周磊. 渤海内主要海湾资源和生态环境承载力比较研究. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(12): 7-12.

[11] 苗丽娟, 王玉广, 张永华, 王权明. 海洋生态环境承载力评价指标体系研究. 海洋环境科学, 2006, 25(3): 75-77.

[12] 马彩华, 游奎, 马伟伟. 海域承载力与海洋生态补偿的关系研究. 中国渔业经济, 2009, 27(3): 106-110.

[13] 何培英. 基于高等海洋教育系统可持续发展的生态承载力分析. 山东大学学报, 2009, (5): 146-151.

[14] 杨振姣, 崔俊, 范洪颖, 林香红, 韩硕洋. 中国海洋生态安全面临的挑战及其原因分析. 中国渔业经济, 2014, 32(4): 12-19.

[15] 高乐华, 高强. 海洋生态经济系统交互胁迫关系验证及其协调度测算. 资源科学, 2012, 34(1): 173-184.

[16] 陈尚, 任大川, 夏涛, 李京梅, 杜国英, 王栋, 王其翔, 张涛. 海洋生态资本理论框架下的生态系统服务评估. 生态学报, 2013, 33(19): 6254-6263.

[17] 张继伟, 杨志峰, 汤军健, 陈楚汉. 基于环境风险的海洋生态补偿标准研究. 海洋环境科学, 2010, 29(5): 751-757.

[18] 李博. 辽宁沿海地区人海经济系统脆弱性评价. 地理科学, 2014, 34(6): 711-716.

[19] 孙才志, 于广华, 王泽宇, 刘锴, 刘桂春. 环渤海地区海域承载力测度与时空分异分析. 地理科学, 2014, 34(5): 513-521.

[20] 狄乾斌, 韩雨汐. 熵视角下的中国海洋生态系统可持续发展能力分析. 地理科学, 2014, 34(6): 664-671.

[21] 陈东景, 李培英, 杜军, 刘乐军, 徐兴永. 基于生态足迹和人文发展指数的可持续发展评价-以我国海洋渔业资源利用为例. 中国软科学, 2006, (5): 96-103.

[22] 刘桂春, 韩增林. 在海陆复合生态系统理论框架下: 浅谈人地关系系统中海洋功能的介入. 人文地理, 2007, 22(3): 51-55, 27-27.

[23] 韩增林, 刘桂春. 人海关系地域系统探讨. 地理科学, 2007, 27(6): 761-767.

[24] 苏伟. 广西近海环境与经济可持续发展水平及协调性分析. 海洋环境科学, 2007, 26(6): 591-593.

[25] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 张妍, 张力小. 基于能值分析的城市生态系统健康评价——以包头市为例. 生态学报, 2008, 28(4): 1720-1728.

[26] 王千, 金晓斌, 周寅康, 阿依吐尔逊·沙木西. 河北省耕地生态经济系统能值指标空间分布差异及其动因. 生态学报, 2011, 31(1): 247-256.

[27] 宋豫秦, 王群超. 基于能值生态足迹的浙江省可持续发展分析. 长江流域资源与环境, 2011, 20(11): 1285-1290.

[28] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. New York: John Wiley, 1996: 182-193.

[29] Campbell D E, Meisch M. Demoss T, Pomponio J, Bradley M P. Keeping the books for environmental systems: an emergy analysis of west Virginia.

Environmental Monitoring and Assessment, 2004, 94(1/3): 217-230.
[30] 杨丙山. 能值分析理论及应用[D]. 长春: 东北师范大学, 2006.
[31] 狄乾斌, 张海红, 曹可. 基于能值的山东省海洋生态足迹研究. 海洋通报, 2015, 34(1): 1-6.
[32] Brown M T. Emergy synthesis-theory and applications of the emergy methodology // Proceedings of the First Biennial Emergy Analysis Research Conference. Florida: Center for Environmental Policy, University of Florida, 2000: 1-410.
[33] Brown M T, Ulgiati S. Emergy measures of carrying capacity to evaluate economic investments. Population and Environment, 2001, 22(5): 471-501.
[34] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002: 1-418.
[35] 宋涛, 蔡建明, 倪攀, 杨振山, 温婷. 基于能值和 DEA 的中国城市新陈代谢效率分析. 资源科学, 2013, 35(11): 2166-2173.
[36] 刘新涛, 刘晓光, 申琪, 张书杰, 杨党伟, 任应党. 合并与不合并: 两个相似性聚类分析方法比较. 生态学报, 2013, 33(11): 3480-3487.
[37] 高乐华, 高强. 中国沿海地区生态经济系统能值分析及可持续评价. 环境污染与防治, 2012, 34(8): 86-93.
[38] 王楠楠, 章锦河, 刘泽华, 钟士恩, 李升峰. 九寨沟自然保护区旅游生态系统能值分析. 地理研究, 2013, 32(12): 2346-2356.